

KALIBRASI DAYA *AC* PADA *POWER QUALITY ANALYZER* DENGAN MENGGUNAKAN *MULTIPRODUCT CALIBRATOR*

AC POWER CALIBRATION ON POWER QUALITY ANALYZER USING A MULTIPRODUCT CALIBRATOR

Hayati Amalia^{1,*} dan Agah Faisal¹

¹Pusat Penelitian Metrologi, Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia, Komplek PUSPIPTEK, Tangerang Selatan 15314, Banten, Indonesia

*E-mail: hayati.amalia.21@gmail.com

ARTICLE INFO

Article history

Received date

31 May 2016

Received in revised form date

3 February 2017

Accepted date

29 March 2017

Available online date

31 May 2017

Abstract

AC power calibration on power quality analyzer by using indirect method has been developed in Research Center for Metrology, Indonesian Institute of Science (LIPI). The measurement was performed by applying input voltage and input current from a standard multiproduct calibrator. Before being transferred to a power quality analyzer, the input current was passed first to the current coil to adapt the measuring range of the coil clamp of the power quality analyzer. Data collection and evaluation to determine the correction and uncertainty were carried out separately and alternately per phase. The analysis to evaluate the measurement correction and uncertainty was developed by considering the parameters that form the AC power, such as voltage, current, and phase angle. Based on the result of the calibration data analysis, it was obtained 5% of correction by the greatest measurement uncertainty of 1.92% at confidence level of 95% and coverage factor $k=2$.

Keywords: Power quality analyzer, Current coil, AC power, Calibration, Uncertainty

Kata kunci:

Power quality analyzer

Current coil

Daya AC

Kalibrasi

Ketidakpastian

Abstrak

Kalibrasi daya *AC* pada *power quality analyzer* dengan menggunakan metode tidak langsung telah dikembangkan di Pusat Penelitian Metrologi Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia. Pengukuran dilakukan dengan cara memberikan tegangan dan arus masukan dari *multiproduct calibrator* standar. Sebelum diumpankan pada *power quality analyzer*, arus masukan dilewatkan terlebih dahulu pada *current coil* untuk menyesuaikan rentang ukur *coil clamp* pada *power quality analyzer*. Pengambilan data serta evaluasi untuk mencari koreksi dan ketidakpastian dilakukan secara terpisah dan bergantian per fase. Analisis data untuk evaluasi koreksi dan ketidakpastian pengukuran dikembangkan dengan memerhatikan parameter-parameter yang membentuk besaran daya *AC*, seperti tegangan, arus, dan sudut fase. Dari hasil analisis data kalibrasi, didapatkan koreksi sebesar 5% dengan ketidakpastian pengukuran terbesar adalah 1,92% pada tingkat kepercayaan 95% dan faktor cakupan $k=2$.

PENDAHULUAN

Sub-bidang Metrologi Kelistrikan di Puslit Metrologi LIPI (P2M-LIPI) saat ini telah memanfaatkan sebuah alat standar berupa *multiproduct calibrator* (MPC) untuk digunakan dalam pelayanan jasa kalibrasi instrumen meter daya (*power meter*). MPC merupakan sumber (*source*) yang sering digunakan sebagai standar pengukuran dari besaran kelistrikan di P2M-LIPI, salah satunya adalah untuk kalibrasi tegangan AC pada sebuah meter secara otomatis (Syahadi, Sardjono, and Khairiyati 2012). Keluaran level tegangan dan arus secara simultan dari MPC, yang mana sinyal arus dapat disinkronisasikan dengan sinyal tegangan, menjadikannya sebagai pembangkit daya beban semu (*phantom load*). *Phantom load* ini adalah suatu sistem yang terintegrasi atas komponen komponen pembangkit tegangan dan arus yang dapat bekerja menyerupai sumber ketenagalistrikan yang seolah olah terbebani oleh suatu beban (Faisal, Perangin-angin, and Syahadi 2012). Selain itu, fase arus dapat digeser-geser pada fase tegangan dari -180° sampai $+180^\circ$. Hal ini merepresentasikan keadaan semu *lagging* dan *leading* suatu sumber daya listrik yang terbebani secara induktif dan kapasitif. Nilai daya yang dihasilkan oleh sumber beban semu ini merupakan multiplikasi komponen-komponen penyusun individu seperti: tegangan, arus, dan sudut fase arus terhadap tegangan, sehingga mengikuti suatu persamaan matematis seperti Persamaan (1) (Faisal 2015).

$$P(V, I, \varphi) [W] = V \times I \times \cos \varphi \quad (1)$$

Dimana:

P	=	daya AC yang disuplai
V	=	tegangan AC yang disuplai
I	=	arus AC yang disuplai

φ = sudut fase arus terhadap tegangan.

Dalam melakukan pelayanan kalibrasi meter daya, meter dengan tipikal *work-bench* yang memiliki sepasang terminal tegangan dan sepasang terminal arus dapat diakomodir secara langsung dengan menggunakan MPC (P2M-LIPI 2012). Oleh karena itu, baik *input terminal* tegangan dan *input terminal* arus dari meter dapat dihubungkan masing-masing secara paralel dan secara seri kepada *output terminal* tegangan dan *output terminal* arus MPC. Akan tetapi dalam pemanfaatannya, tipikal meter seperti ini biasanya hanya digunakan pada laboratorium. Pemanfaatannya untuk digunakan secara langsung pada utilitas memerlukan tambahan trafo instrumentasi seperti *voltage transformer* (VT) dan *current transformer* (CT) (Bucci, Landi, and Capua 1999).

Untuk mengakses konsumsi daya secara langsung dari utilitas, pemanfaatan tipikal instrumen ukur yang *portable* lebih banyak digunakan. Selain memiliki rentang ukur yang lebih besar, pemanfaatannya tidak perlu memutus arus beban yang sedang digunakan. Dewasa ini, masyarakat yang melakukan pengukuran daya AC dalam aktivitas pekerjaannya mulai banyak menggunakan instrumen ukur daya yang disebut *power quality analyzer* (PQA). Dalam aplikasi PQA, pengguna tidak perlu lagi merangkai meter dan sumber arus secara seri untuk mendapatkan besar arus yang mengalir pada beban, tetapi cukup menangkapkan *coil clamp* pada penghantar/kabel dan arus yang mengalir sudah dapat dibaca (Fluke Corporation 2006).

Untuk mendapatkan nilai baca daya AC yang benar dari suatu PQA, maka alat tersebut harus dikalibrasi. Studi tentang kalibrasi PQA pernah dilakukan sebelumnya dengan menggunakan standar *power quality calibrator* Fluke 6100A, tetapi

hanya untuk besaran tegangan, baik tegangan yang berbentuk sinusoidal maupun non-sinusoidal (Cepisca et al. 2013). Dalam penelitian ini, pengukuran dilakukan dengan membandingkan penunjukan nilai daya AC pada PQA dan penunjukan pada standar MPC. Tidak seperti tipikal *work-bench power meter* yang dapat diakomodir secara langsung menggunakan prosedur baku yang dikembangkan oleh P2M-LIPI (Munir and Faisal 2014), pengembangan metode kalibrasi perlu dilakukan untuk tipikal *portable power meter* ini.

Pengembangan metode kalibrasi daya AC untuk PQA menggunakan MPC telah dilakukan dalam penelitian ini. Hal tersebut dilakukan untuk mendapatkan nilai koreksi dan estimasi ketidakpastian yang valid dan tertelusur ke SI. Ketertelusuran daya yang dibangkitkan oleh MPC adalah melalui *Standard Power Meter* RMM 3001 yang tertelusur kepada SI melalui Lembaga Metrologi Nasional Australia/NMIA (National Measurement Institute of Australia 2012). Kalibrasi daya AC untuk PQA dilakukan dengan memanfaatkan perangkat bantu berupa pengali arus yang disebut dengan *current coil* yang terhubung langsung dengan standar MPC. *Current coil* ini bekerja dengan prinsip kerja seperti transformator arus dengan jumlah lilitan (N) tertentu (Fluke Corporation 2002). Ketika digunakan sebagai standar untuk pembangkit daya, kombinasi antara MPC dan *current coil* ini akan menghasilkan daya sesuai Persamaan (2) (Fluke Corporation 2002).

$$P_{STD} [W] = V_{STD} \times I_{STD} \times N \times \cos \phi \quad (2)$$

Dimana:

P_{STD} = daya yang dibangkitkan

V_{STD} = tegangan ter-setting pada MPC

I_{STD} = arus ter-setting pada MPC

N = jumlah lilitan *current coil*

ϕ = sudut fase arus terhadap tegangan

Persamaan matematis koreksi pembacaan PQA pada besaran daya AC telah diuraikan berdasarkan fenomena aktual pengukuran dan evaluasi ketidakpastian telah diturunkan dari Persamaan (2) tersebut. Koreksi dan ketidakpastian pengukuran dievaluasi dengan memperhatikan parameter tegangan, arus, dan sudut fase yang disuplai oleh MPC dan dilewatkan dengan menggunakan *current coil*.

METODE

Kalibrasi *power quality analyzer* (PQA) dilakukan dengan menggunakan metode tidak langsung dimana standar yang digunakan adalah berupa *multiproduct calibrator* (MPC) Fluke 5520A. Kalibrasi ini juga menggunakan perangkat pengali arus *current coil* 50-turn Fluke 5500A yang dihubungkan pada kanal arus MPC. Besaran yang diukur pada PQA adalah daya aktif, sedangkan nilai yang dikeluarkan oleh standar adalah nilai dalam besaran tegangan AC, arus AC, dan sudut fase.

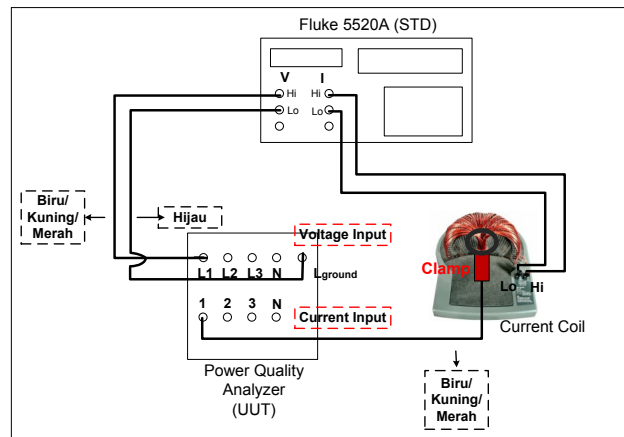
MPC merupakan sumber (*source*) yang hanya dapat mengeluarkan tegangan AC dan arus AC satu fase. Karena itu, dalam metode kalibrasi ini, pengambilan data, evaluasi koreksi, dan evaluasi ketidakpastian dilakukan per fase secara terpisah dan bergantian, serta tidak dilakukan pengukuran dan evaluasi terhadap daya AC tiga (3) fase total. Masing-masing fase diukur menggunakan kanal tegangan, kanal arus, dan *coil clamp* yang telah ditentukan secara spesifik sebagaimana Tabel 1 berikut.

Tabel 1. Pengaturan koneksi

Fase	Kanal Tegangan	Warna Kabel	Kanal Arus	Coil Clamp
1	Line 1	Biru	Line 1	SN. 93830035
2	Line 2	Kuning	Line 2	SN. 93930037
3	Line 3	Merah	Line 3	SN. 93720129

Berdasarkan diagram skematik pengukuran yang disajikan oleh Gambar 1, tegangan dari standar diumpankan langsung pada PQA dengan menggunakan pengkabelan dua kawat. Sedangkan untuk jalur arus, sebelum diumpankan pada PQA, arus dari standar MPC dilewatkan terlebih dahulu pada perangkat bantu *current coil* untuk menyesuaikan rentang ukur *coil clamp* sebagai sensor arus. Hal ini disebabkan rentang arus tertinggi dari MPC terbatas hanya sampai 20 A saja (Fluke Corporation 2003), sedangkan dalam kalibrasi PQA dibutuhkan arus hingga 100 A. Selanjutnya, *coil clamp* yang telah terhubung pada PQA dikaitkan pada *current coil*.

Pada masing-masing fase dilakukan pengukuran untuk empat titik ukur tegangan dan arus yang ditunjukkan oleh Tabel 2. Masing-masing titik ukur arus dan tegangan diambil data untuk lima sudut fase yang berbeda, yaitu 0° , -36.87° , $+36.87^\circ$, -60° , dan $+60^\circ$. Untuk setiap sudut fase pada satu titik ukur, pengambilan data dilakukan sebanyak lima kali. Pengukuran pada semua fase dan titik ukur dilakukan pada frekuensi 53 Hz. Pemilihan sudut fase 0° , -60° , dan $+60^\circ$, serta frekuensi 53 Hz adalah mengikuti sudut fase dan frekuensi yang diuji bandingkan pada CCEM-K5, Comparison of 50/60 Hz Power (Carranza et al., n.d.). Sedangkan sudut fase -36.87° dan $+36.87^\circ$ merupakan sudut untuk menghasilkan faktor daya standar, yaitu sebesar minimal 0.8. Faktor daya tersebut untuk mengakomodir asesmen pada kriteria batas persyaratan operasi bagi unit pembangkit sebagaimana tertuang dalam aturan jaringan sistem tenaga listrik Jawa - Madura - Bali (KESDM 2007)



Gambar 1. Diagram skematik sistem kalibrasi PQA untuk pengambilan data

Tabel 2. Titik ukur pada kalibrasi PQA

Tegangan (Volt)	Arus (Ampere)
120	5
240	5
240	30
240	100

Besaran kelistrikan yang diukur pada penelitian ini adalah daya aktif AC dan nilai yang dievaluasi adalah koreksi dan ketidakpastian dari fungsi pembacaan level daya aktif AC. Model matematika yang digunakan ditunjukkan oleh Persamaan (3), dimana P_{STD} merupakan daya aktif yang dihasilkan oleh kombinasi antara MPC dan *current coil*, sedangkan P_{UUC} adalah rata-rata pembacaan daya AC dari PQA. Secara matematis P_{STD} didefinisikan oleh Persamaan (2) sehingga persamaan untuk mencari koreksi dapat diturunkan seperti pada Persamaan (4).

$$C[W] = P_{STD} - P_{UUC} \quad (3)$$

$$C[W] = [V_{STD} \cdot I_{STD} \cdot N \cdot \cos \phi] - P_{UUC} \quad (4)$$

Nilai tegangan dan arus ter-setting pada standar (V_{STD} dan I_{STD}) adalah nilai nominal yang ditunjukkan oleh MPC. Nilai ini perlu dikoreksi terlebih dahulu untuk mendapatkan nilai tegangan dan arus aktual yang disuplai pada PQA. Koreksi yang perlu ditambahkan meliputi koreksi dari standar yang digunakan (MPC) dan koreksi yang disebabkan oleh faktor-faktor lainnya, seperti: koreksi yang disebabkan oleh *gain* dan linieritas MPC, koreksi karena adanya *loading effect*, koreksi yang disebabkan oleh *drift* MPC, koreksi akibat *temperature coefficient*, dan koreksi yang bersumber dari stabilitas MPC. Nilai koreksi beserta ketidakpastian dari standar yang digunakan diperoleh dari sertifikat kalibrasi. Nilai koreksi dan ketidakpastian yang diambil dari sertifikat MPC ini selanjutnya berturut-turut disebut koreksi dan ketidakpastian (dari) sertifikat. Sedangkan nilai koreksi yang berasal dari faktor yang lainnya (yaitu: *gain*, linieritas, *loading effect*, *drift*, *temperature coefficient*, dan stabilitas) berasal dari data acuan. Dalam penelitian ini penentuan dari faktor-faktor koreksi tersebut diabaikan dan bernilai nol pada formulasi perhitungan koreksi. Akan tetapi, faktor-faktor koreksi tersebut diperhitungkan dan dikompensasi pada perhitungan ketidakpastian. Nilai ketidakpastian gabungan untuk faktor selain sertifikat kalibrasi diambil dari spesifikasi teknis MPC (Fluke Corporation 2003). Untuk mempermudah pembahasan, untuk selanjutnya ketidakpastian akibat faktor-faktor lain di luar sertifikat MPC ini disebut sebagai ketidakpastian (dari) spesifikasi MPC.

Arus yang dikeluarkan oleh MPC (I_{STD}) dilewatkan terlebih dahulu pada *current coil* dan mengalami penguatan (N) sebelum diumpankan pada kanal masukan arus PQA. Serupa dengan tegangan, arus keluaran dari dari MPC kemudian melalui *current coil* juga dipengaruhi oleh fak-

tor-faktor seperti linieritas, stabilitas, *temperature coefficient*, dan *drift*. Oleh karena itu perlu ditambahkan koreksi. Koreksi yang diketahui, seperti yang diperoleh dari sertifikat kalibrasi, dapat diimplementasikan dalam persamaan dan koreksi yang belum diketahui nilainya dapat diimplementasikan bernilai nol dalam persamaan. Namun demikian, masing-masing sumber ketidakpastian tetap diperhitungkan dalam perhitungan ketidakpastian yang mana nilainya diambil dari spesifikasi teknis MPC dan *current coil*.

Sudut fase (ϕ) yang diatur pada MPC juga merupakan nilai nominal. Koreksi pada nilai sudut fase diabaikan dengan tetap memperhitungkan ketidakpastian yang nilainya diambil dari spesifikasi teknis MPC untuk parameter sudut fase.

Data yang ditunjukkan oleh PQA terbatas hanya sampai digit tertentu. Artinya, data daya AC yang dibaca oleh PQA dipengaruhi oleh resolusi terkecil dari pembacaan. Koreksi resolusi ditambahkan dalam persamaan yang nilainya sama dengan nol dan ketidakpastian yang nilainya proporsional dengan setengah resolusi.

Berdasarkan pemaparan di atas, Persamaan (4) dapat diturunkan menjadi Persamaan (6), yang merupakan persamaan untuk mencari nilai koreksi pembacaan daya aktif AC.

Setelah dilakukan evaluasi untuk mendapatkan koreksi pembacaan daya aktif AC, pada setiap titik ukur dilakukan evaluasi untuk mendapatkan ketidakpastian pengukuran. Evaluasi terhadap sumber-sumber ketidakpastian pada kalibrasi PQA secara tidak langsung dilakukan dengan dua metode, yaitu tipe-A dan tipe-B sesuai dengan kaidah perhitungan ketidakpastian pengukuran (JCGM 2008) dan *lesson learned* dari studi kasus pengukuran arus (Jaiswal, Ojha, and Singh 2005).

$$C[W] = [(V_{STD} + C_{sertV} + C_{spekV}) \cdot (I_{STD} + C_{sertI} + C_{spekI}) \cdot (N + C_{spekN}) \cdot \cos(\phi + C_\phi)] - [P_{ave} + C_{res}] \quad (5)$$

$$C[W] = [(V_{STD} + C_{sertV}) \cdot (I_{STD} + C_{sertI}) \cdot N \cdot \cos(\phi)] - [P_{ave}] \quad (6)$$

Keterangan:

V_{STD}	=	tegangan AC ter-setting pada MPC
I_{STD}	=	arus AC ter-setting pada MPC
N	=	jumlah lilitan <i>current coil</i>
ϕ	=	sudut fase ter-setting pada MPC
P_{ave}	=	rata-rata pembacaan daya pada PQA
C_{sertV}	=	koreksi sertifikat MPC untuk parameter tegangan AC
C_{sertI}	=	koreksi sertifikat MPC untuk parameter arus AC
C_{spekV}	=	koreksi akibat adanya <i>gain</i> , linieritas, <i>loading effect</i> , <i>drift</i> , <i>temperature coefficient</i> , dan stabilitas MPC untuk parameter tegangan AC
C_{spekI}	=	koreksi akibat adanya <i>gain</i> , linieritas, <i>loading effect</i> , <i>drift</i> , <i>temperature coefficient</i> , dan stabilitas MPC untuk parameter arus AC
C_{spekN}	=	koreksi akibat adanya linieritas, stabilitas, <i>temperature coefficient</i> , dan <i>drift current coil</i>
C_ϕ	=	koreksi akibat adanya <i>gain</i> , linieritas, <i>loading effect</i> , <i>drift</i> , <i>temperature coefficient</i> , dan stabilitas MPC untuk parameter sudut fase
C_{res}	=	koreksi resolusi

Ketidakpastian tipe-A adalah ketidakpastian yang nilainya didapatkan melalui pendekatan secara statistik. Sedangkan ketidakpastian tipe-B adalah ketidakpastian yang nilainya diperoleh berdasarkan informasi-informasi yang memungkinkan untuk didapatkan dari standar atau alat lain yang digunakan. Informasi-informasi tersebut dapat meliputi data pengukuran yang dilakukan sebelumnya, pengalaman atau pengetahuan tentang perilaku alat, spesifikasi teknis pabrikan, data dari sertifikat kalibrasi, atau data dari buku manual (JCGM 2008).

Dalam metode kalibrasi ini, ketidakpastian pengukuran berasal dari dua sumber, yaitu realisasi nilai acuan daya AC beserta *current coil* dan pembacaan nilai oleh PQA. Berdasarkan acuan model matematika untuk koreksi pembacaan level daya AC yang ditunjukkan oleh Persamaan (3), nilai-nilai koefisien sensitivitas untuk semua besaran input adalah sama dengan satu. Ketidakpastian gabungan tersebut dapat dituliskan dengan formulasi sebagaimana pada Persamaan (7).

$$u_c(C)[W] = \sqrt{u_1^2(P_{STD}) + u_2^2(P_{UUC})} \quad (7)$$

Dimana:

$u_1(P_{STD})$	=	Ketidakpastian daya AC yang ter-setting pada MPC dan <i>current coil</i>
$u_2(P_{UUC})$	=	Ketidakpastian yang bersumber dari pembacaan nilai oleh PQA

Ketidakpastian Daya AC Yang Ter-setting pada MPC dan *Current Coil* ($u_I(P_{STD})$)

Sesuai dengan model matematika daya aktif AC yang ditunjukkan oleh Persamaan (2), ketidakpastian u_I merupakan ketidakpastian gabungan dari ketidakpastian yang bersumber dari parameter tegangan AC MPC (u_V), arus AC MPC (u_I), sudut fase MPC (u_ϕ), dan *current coil* (u_N). Untuk mempermudah perhitungan, ketidakpastian ini dihitung dalam nilai relatifnya. Langkah ini akan mempercepat proses perhitungan dan meminimalisir terjadinya kesalahan penurunan formula untuk menghitung koefisien sensitivitas, tetapi tidak menghilangkan faktor-faktor penyusun ketidakpastian gabungan.

Ketidakpastian dari parameter tegangan AC MPC (u_V)

Ketidakpastian yang berasal dari parameter tegangan AC yang disuplai oleh MPC (u_V) merupakan ketidakpastian gabungan antara ketidakpastian sertifikat untuk parameter tegangan AC (u_{sertV}) dan ketidakpastian spesifikasi MPC untuk parameter tegangan AC (u_{spekV}). Ketidakpastian ini secara matematis dinyatakan oleh Persamaan (8). Nilai u_V selanjutnya dinyatakan dalam bentuk relatif dengan menggunakan Persamaan (9) dimana $V_{setting}$ adalah tegangan suplai yang ditunjukkan oleh MPC.

$$u_V [V] = \sqrt{u_{sertV}^2 + u_{spekV}^2} \quad (8)$$

$$u_V \text{ Relatif } [\%] = \frac{u_V}{V_{setting}} \cdot 100\% \quad (9)$$

Ketidakpastian sertifikat untuk parameter tegangan AC (u_{sertV}) dievaluasi dengan menggunakan metode tipe B dengan diasumsikan terdistribusi normal dan secara matematis dinyatakan dengan:

$u_{sertV} = U/2$, dimana U adalah ketidakpastian MPC untuk parameter tegangan AC yang didapatkan dari sertifikat kalibrasi MPC tahun 2015 (P2M-LIPI 2015). Ketidakpastian spesifikasi MPC untuk parameter tegangan AC (u_{spekV}) dievaluasi dengan menggunakan metode tipe B dengan diasumsikan terdistribusi normal dengan tingkat kepercayaan 99% dan secara matematis dinyatakan dengan $u_{spekV} = U/2.6$, dimana U didefinisikan sebagai ketidakpastian absolut yang didapatkan dari *Operating Manual Book* MPC (Fluke Corporation 2003).

Ketidakpastian dari parameter arus AC MPC (u_I)

Ketidakpastian yang berasal dari parameter arus AC yang disuplai oleh MPC (u_I) merupakan ketidakpastian gabungan antara ketidakpastian sertifikat untuk parameter arus AC (u_{sertI}) dengan ketidakpastian spesifikasi MPC untuk parameter arus AC (u_{spekI}). Ketidakpastian ini secara matematis dinyatakan oleh Persamaan (10). Nilai u_I ini selanjutnya dinyatakan dalam bentuk relatif dengan menggunakan Persamaan (11) dimana $I_{setting}$ adalah arus suplai yang ditunjukkan oleh MPC.

$$u_I [A] = \sqrt{u_{sertI}^2 + u_{spekI}^2} \quad (10)$$

$$u_I \text{ Relatif } [\%] = \frac{u_I}{I_{setting}} \cdot 100\% \quad (11)$$

Ketidakpastian sertifikat untuk parameter arus AC (u_{sertI}) dievaluasi dengan menggunakan metode tipe B dengan diasumsikan terdistribusi normal dan secara matematis dinyatakan dengan $u_{sertI} = U/2$, dimana U adalah ketidakpastian MPC untuk parameter arus AC yang didapatkan

dari sertifikat kalibrasi MPC tahun 2015 (P2M-LIPI 2015). Ketidakpastian spesifikasi MPC untuk parameter arus AC (u_{spekl}) dievaluasi dengan menggunakan metode tipe B dengan diasumsikan terdistribusi normal dengan tingkat kepercayaan 99% dan secara matematis dinyatakan dengan $u_{spekl} = U/2.6$, dimana U adalah ketidakpastian absolut yang didapatkan dari *Operating Manual Book* MPC (Fluke Corporation 2003).

Ketidakpastian dari parameter sudut fase MPC (u_ϕ)

Ketidakpastian yang berasal dari parameter sudut fase yang disetel pada MPC (u_ϕ) dievaluasi menggunakan metode tipe B. Formulasi spesifikasi teknis yang digunakan untuk mendapatkan nilai ketidakpastian ini telah dinyatakan dalam besaran relatif dan tercantum pada *Operating Manual Book* MPC (Fluke Corporation 2003). Dengan distribusi yang diasumsikan tersebar secara normal dan tingkat kepercayaan 99%, formulasi untuk mencari ketidakpastian ini dituliskan pada Persamaan (12).

$$u_\phi [\%] = \frac{\left[1 - \frac{\cos(\phi + \Delta_\phi)}{\cos(\phi)} \right]}{2.6} \cdot 100\% \quad (12)$$

Dimana:

u_ϕ = ketidakpastian dari parameter sudut fase

ϕ = sudut fase
 Δ_ϕ = ketidakpastian mutlak sudut fase untuk satu tahun, berdasarkan frekuensi kerja yang digunakan.

Ketidakpastian dari perangkat bantu current coil (u_N)

Ketidakpastian yang berasal dari perangkat bantu *current coil* dievaluasi menggunakan metode tipe B. Ketidakpastian ini diasumsikan terdistribusi normal dengan tingkat kepercayaan 99% (Fluke Corporation 2002) dan secara matematis dinyatakan pada Persamaan (13).

$$u_N [\%] = \frac{U}{2.6} \quad (13)$$

U didefinisikan sebagai spesifikasi total dari arus efektif keluaran *current coil* yang diukur. Nilai U didapatkan dari *Instruction Sheet Current Coil Fluke 5500A* (Fluke Corporation 2002).

Ketidakpastian daya AC yang ter-setting pada MPC dan *current coil* ($u_1(P_{STD})$) didefinisikan sebagai ketidakpastian gabungan dari empat parameter di atas dengan formula yang dinyatakan dengan Persamaan (14). Untuk mendapatkan nilai absolutnya, $u_1(P_{STDRelatif})$ harus dikalikan dengan daya ter-setting pada standar MPC yang diumpankan pada PQA ($P_{setting}$) sesuai dengan Persamaan (15).

$$u_1(P_{STDRelatif}) [\%] = \sqrt{u_{VRelatif}^2 + u_{IRelatif}^2 + u_\phi^2 + u_N^2} \quad (14)$$

$$u_1(P_{STD}) [W] = \frac{u_1(P_{STDRelatif})}{100} \cdot P_{Setting} \quad (15)$$

Ketidakpastian yang Bersumber dari Pembacaan Nilai oleh PQA ($u_2(P_{UUC})$)

Pembacaan daya AC yang dilakukan oleh PQA secara matematis ditunjukkan oleh Persamaan (16) dimana P_{ave} adalah rata-rata pembacaan dari lima kali pengambilan data. Dalam metode analisis ini, koreksi resolusi (C_{res}) pada Persamaan (5) dianggap nol. Oleh karena itu, parameter C_{res} ini dimasukkan dalam salah satu komponen ketidakpastian sebagai kompensasi tindakan tersebut. Dengan demikian, ketidakpastian yang bersumber dari pembacaan data oleh PQA terdiri atas dua komponen ketidakpastian, yaitu pembacaan berulang oleh PQA (*repeatability*) dan pembacaan skala terkecil (resolusi).

$$P_{UUC}[W] = P_{ave} + C_{res} \quad (16)$$

Berdasarkan Persamaan (16), ketidakpastian yang bersumber dari PQA ($u_2(P_{UUC})$) merupakan ketidakpastian gabungan antara ketidakpastian *repeatability* dan ketidakpastian resolusi dengan besar koefisien sensitivitas masing-masing adalah berharga satu. Secara matematis dinyatakan oleh Persamaan (17).

$$u_2(P_{UUC})[W] = \sqrt{u(P_{ave})^2 + u_{res}^2} \quad (17)$$

Ketidakpastian pembacaan berulang ($u(P_{ave})$) dievaluasi secara analisis tipe-A menggunakan simpangan baku rata-rata experimental (*Experiment Standard Deviation of Mean*) dari lima kali pengambilan data (JCGM 2008). Dikarenakan pengambilan data dilakukan sebanyak lima kali, maka derajat kebebasan ketidakpastian ini adalah 4. Sedangkan ketidakpastian pembacaan skala terkecil (u_{res}) dievaluasi menggunakan metode tipe-B dengan diasumsikan terdistribusi segi empat dengan derajat kebebasan tak hingga.

Nilai ketidakpastian akhir yang dicari pada kalibrasi PQA ini merupakan ketidakpastian bentangan (*Expanded Uncertainty*) dengan tingkat kepercayaan 95%. Faktor cakupan yang digunakan dan perhitungan ketidakpastian gabungan mengacu pada panduan GUM (JCGM 2008).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Data hasil kalibrasi PQA yang berhasil diambil untuk ketiga fase ditunjukkan oleh Tabel 3 pada kolom Pembacaan Alat. Data tersebut merupakan rata-rata dari lima kali pengambilan data dan selanjutnya digunakan sebagai dasar dalam mencari nilai koreksi dan ketidakpastian pengukuran.

Koreksi penunjukan level daya AC dicari dengan menggunakan Persamaan (6). Koreksi sertifikat untuk parameter tegangan (C_{sertV}) dan arus (C_{sertI}) diambil dari sertifikat kalibrasi MPC tahun 2015. Untuk titik ukur yang tidak tercantum pada sertifikat tersebut, dilakukan metode interpolasi untuk mendapatkan nilai koreksinya. Dengan menggunakan Persamaan (6), didapatkan nilai koreksi penunjukan level daya AC untuk masing-masing titik ukur pada fase 1, fase 2, dan fase 3 seperti yang ditunjukkan pada Tabel 3. Hasil evaluasi menunjukkan koreksi terbesar untuk setiap titik ukur tegangan dan arus terjadi pada sudut fase $+60^\circ$ dan -60° . Untuk semua titik ukur pada semua fase, koreksi terbesar terjadi pada fase 1, yaitu pada titik ukur 240 V, 5 A, dan sudut fase $+60^\circ$, dengan besar nilai koreksinya, yaitu 5%.

Setelah koreksi untuk setiap titik ukur didapatkan, ketidakpastian pengukuran dihitung berdasarkan Persamaan (7) dan juga perhitungan ketidakpastian bentangan. Dari hasil evaluasi ketidakpastian yang disajikan pada Tabel 4 didapatkan bahwa ketidakpastian terbesar untuk setiap titik ukur arus dan tegangan terjadi pada

sudut fase $+60^\circ$ dan -60° . Dari semua titik ukur arus, tegangan, dan sudut fase yang diambil, ketidakpastian terbesar terdapat pada titik ukur 120 V, 5 A, serta sudut

fase $+60$ dan -60 , yaitu sebesar 1,92%. Hal ini terjadi pada semua fase (fase 1, 2, dan 3).

Tabel 3. Data hasil pengukuran dan koreksi penunjukan daya AC pada kalibrasi PQA

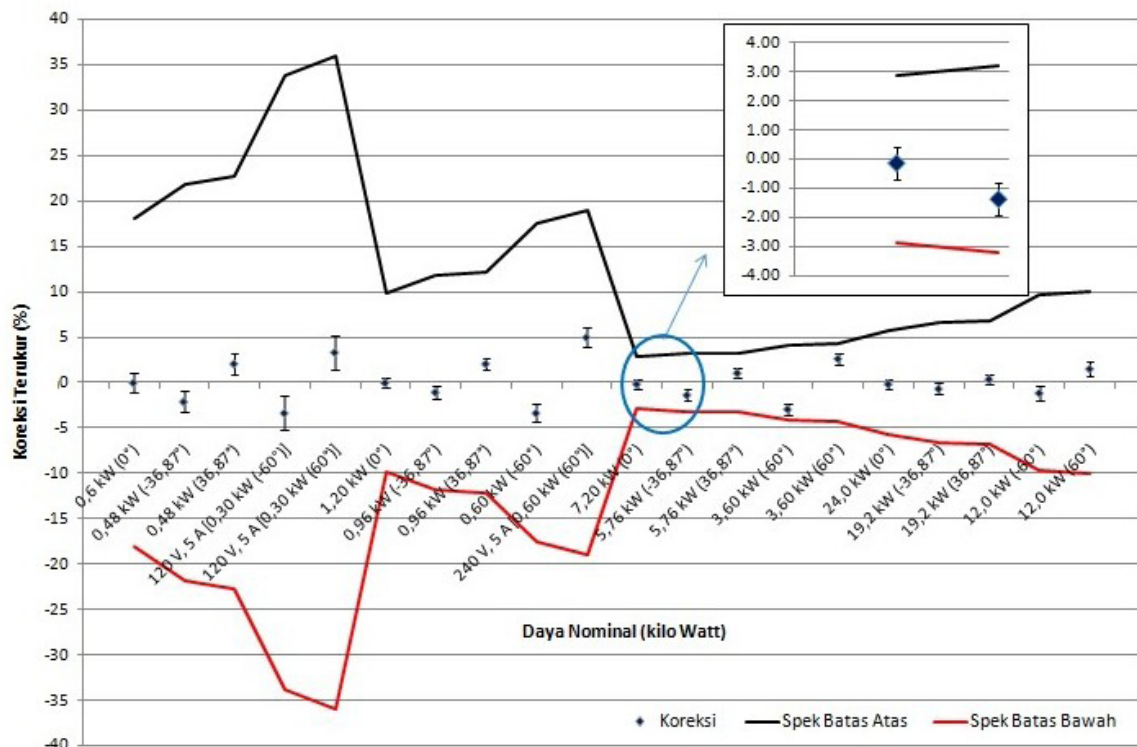
Tegangan setting (V)	Arus setting (A)	Sudut (Deg)	Daya setting (kW)	Fase 1			Fase 2			Fase 3		
				Bacaan Alat (kW)	Koreksi (kW)	(%)	Bacaan Alat (kW)	Koreksi (kW)	(%)	Bacaan Alat (kW)	Koreksi (kW)	(%)
120	5	0	0,60	0,60	0,00	0,00	0,60	0,00	0,00	0,60	0,00	0,00
		-36,87	0,48	0,49	-0,01	-2,09	0,48	0,00	0,00	0,49	-0,01	-2,09
		+36,87	0,48	0,47	0,01	2,08	0,47	0,01	2,08	0,47	0,01	2,08
		-60	0,30	0,31	-0,01	-3,34	0,31	-0,01	-3,34	0,31	-0,01	-3,34
		+60	0,30	0,29	0,01	3,33	0,29	0,01	3,33	0,29	0,01	3,33
240	5	0	1,20	1,20	0,00	0,00	1,20	0,00	0,00	1,20	0,00	0,00
		-36,87	0,96	0,97	-0,01	-1,05	0,97	-0,01	-1,05	0,97	-0,01	-1,05
		+36,87	0,96	0,94	0,02	2,08	0,94	0,02	2,08	0,94	0,02	2,08
		-60	0,60	0,62	-0,02	-3,34	0,62	-0,02	-3,34	0,62	-0,02	-3,34
		+60	0,60	0,57	0,03	5,00	0,58	0,02	3,33	0,58	0,02	3,33
240	30	0	7,20	7,20	-0,01	-0,14	7,19	0,00	0,00	7,20	-0,01	-0,14
		-36,87	5,76	5,83	-0,08	-1,36	5,80	-0,05	-0,84	5,83	-0,08	-1,36
		+36,87	5,76	5,69	0,06	1,07	5,70	0,05	0,90	5,69	0,06	1,07
		-60	3,60	3,70	-0,11	-2,92	3,67	-0,08	-2,09	3,70	-0,11	-2,92
		+60	3,60	3,50	0,09	2,63	3,52	0,07	2,08	3,50	0,09	2,63
240	100	0	24,0	24,0	-0,03	-0,14	23,8	0,17	0,69	23,8	0,17	0,69
		-36,87	19,2	19,3	-0,13	-0,66	19,1	0,07	0,38	19,2	-0,03	-0,14
		+36,87	19,2	19,1	0,07	0,38	18,9	0,27	1,42	18,9	0,27	1,42
		-60	12,0	12,1	-0,14	-1,14	12,0	-0,02	-0,14	12,1	-0,12	-0,98
		+60	12,00	11,8	0,18	1,52	11,80	0,18	1,52	11,70	0,28	2,36

Tabel 4. Ketidakpastian setiap titik ukur pada kalibrasi PQA

Tegangan setting (V)	Arus setting (A)	Sudut (deg)	Ketidakpastian Bentangan Fase 1		Ketidakpastian Bentangan Fase 2		Ketidakpastian Bentangan Fase 3	
			(kW)	%	(kW)	%	(kW)	%
120	5	0	0,01	0,99	0,01	0,99	0,01	0,99
		-36,87	0,01	1,22	0,01	1,22	0,01	1,22
		+36,87	0,01	1,22	0,01	1,22	0,01	1,22
		-60	0,01	1,92	0,01	1,92	0,01	1,92
		+60	0,01	1,92	0,01	1,92	0,01	1,92
240	5	0	0,01	0,55	0,01	0,55	0,01	0,55
		-36,87	0,01	0,66	0,01	0,66	0,01	0,66
		+36,87	0,01	0,66	0,01	0,66	0,01	0,66
		-60	0,01	1,01	0,01	1,01	0,01	1,01
		+60	0,01	1,01	0,01	1,01	0,01	1,01
240	30	0	0,04	0,55	0,04	0,55	0,04	0,55
		-36,87	0,03	0,56	0,03	0,56	0,03	0,56
		+36,87	0,03	0,56	0,03	0,56	0,03	0,56
		-60	0,02	0,61	0,02	0,61	0,02	0,61
		+60	0,02	0,61	0,02	0,61	0,02	0,61
240	100	0	0,1	0,57	0,1	0,57	0,1	0,57
		-36,87	0,1	0,60	0,1	0,60	0,1	0,60
		+36,87	0,1	0,60	0,1	0,60	0,1	0,60
		-60	0,1	0,81	0,1	0,73	0,1	0,73
		+60	0,1	0,73	0,1	0,73	0,1	0,73

Tabel 5. Komponen-komponen ketidakpastian untuk semua titik ukur pada pengukuran fase 1

Teg set (V)	Arus set (A)	Sud (deg)	u1	u2	u3	u4	u _{relatif}	u5	u6	u _{relatif}	u7	u8	u(ps)		u _{combined}	U _{exp} [%]
			(ESDM) [kW]	(Resolusi) [kW]	(Sert std tegangan) [V]	(Spek std tegangan) [V]	(u3+u4) [%]	(Sert std arus) [A]	(Spek std arus) [A]	(u5+u6) [%]	(Spek coil clamp) [%]	(Spek PF Adder) [%]	(u _{relatif} +u _{relatif} +u7+u8) [%]	[kW]	(u(ps)+u1+u2) [kW]	
120	5	0	0,00000	0,00289	0,00750	0,00954	0,0101	0,00005	0,00005	0,0667	0,1308	0,0001	0,1472	0,00088	0,00302	0,99
		-36,87	0,00000	0,00289	0,00750	0,00954	0,0101	0,00005	0,00005	0,0667	0,1308	-0,0503	0,1555	0,00075	0,00298	1,22
		+36,87	0,00000	0,00289	0,00750	0,00954	0,0101	0,00005	0,00005	0,0667	0,1308	0,0504	0,1556	0,00075	0,00298	1,22
		-60	0,00000	0,00289	0,00750	0,00954	0,0101	0,00005	0,00005	0,0667	0,1308	-0,1162	0,1875	0,00056	0,00294	1,92
		+60	0,00000	0,00289	0,00750	0,00954	0,0101	0,00005	0,00005	0,0667	0,1308	0,1163	0,1876	0,00056	0,00294	1,92
240	5	0	0,00000	0,00289	0,01500	0,01831	0,0099	0,00005	0,00005	0,0667	0,1308	0,0001	0,1471	0,00177	0,00338	0,55
		-36,87	0,00000	0,00289	0,01500	0,01831	0,0099	0,00005	0,00005	0,0667	0,1308	-0,0503	0,1555	0,00149	0,00325	0,66
		+36,87	0,00000	0,00289	0,01500	0,01831	0,0099	0,00005	0,00005	0,0667	0,1308	0,0504	0,1555	0,00149	0,00325	0,66
		-60	0,00000	0,00289	0,01500	0,01831	0,0099	0,00005	0,00005	0,0667	0,1308	-0,1162	0,1875	0,00112	0,00310	1,01
		+60	0,00000	0,00289	0,01500	0,01831	0,0099	0,00005	0,00005	0,0667	0,1308	0,1163	0,1876	0,00113	0,00310	1,01
240	30	0	0,00000	0,00289	0,01500	0,01831	0,0099	0,00138	0,00035	0,2370	0,1397	0,0001	0,2753	0,01982	0,02003	0,55
		-36,87	0,00000	0,00289	0,01500	0,01831	0,0099	0,00138	0,00035	0,2370	0,1397	-0,0503	0,2799	0,01612	0,01638	0,56
		+36,87	0,00000	0,00289	0,01500	0,01831	0,0099	0,00138	0,00035	0,2370	0,1397	0,0504	0,2799	0,01612	0,01638	0,56
		-60	0,00000	0,00289	0,01500	0,01831	0,0099	0,00138	0,00035	0,2370	0,1397	-0,1162	0,2988	0,01076	0,01114	0,61
		+60	0,00000	0,00289	0,01500	0,01831	0,0099	0,00138	0,00035	0,2370	0,1397	0,1163	0,2989	0,01076	0,01114	0,61
240	100	0	0,00000	0,02887	0,01500	0,01831	0,0099	0,00459	0,00100	0,2349	0,1173	0,0001	0,2628	0,06307	0,06936	0,57
		-36,87	0,00000	0,02887	0,01500	0,01831	0,0099	0,00459	0,00100	0,2349	0,1173	-0,0503	0,2675	0,05137	0,05892	0,60
		+36,87	0,00000	0,02887	0,01500	0,01831	0,0099	0,00459	0,00100	0,2349	0,1173	0,0504	0,2676	0,05137	0,05893	0,60
		-60	0,02000	0,02887	0,01500	0,01831	0,0099	0,00459	0,00100	0,2349	0,1173	-0,1162	0,2873	0,03448	0,04922	0,81
		+60	0,00000	0,02887	0,01500	0,01831	0,0099	0,00459	0,00100	0,2349	0,1173	0,1163	0,2874	0,03448	0,04497	0,73



Gambar 2. Grafik nilai koreksi dan ketidakpastian PQA untuk semua titik ukur pada fase 1

Tipikal pengukuran pada fase 1 yang tersaji pada Tabel 5, komponen ketidakpastian yang berperan sebagai penyumbang terbesar dibedakan menjadi dua macam berdasarkan rentang arus yang diberikan pada PQA. Untuk arus yang rendah (di bawah 30A), penyumbang ketidakpastian terbesar adalah ketidakpastian resolusi. Sedangkan pada rentang arus tinggi (di atas 30 A), penyumbang ketidakpastian terbesar adalah ketidakpastian sertifikat MPC untuk parameter arus.

Nilai koreksi dan ketidakpastian yang telah didapatkan dari hasil evaluasi kemudian diverifikasi dengan spesifikasi akurasi PQA. Grafik pada Gambar 2 menunjukkan nilai koreksi dan ketidakpastian untuk semua titik ukur tidak melebihi garis batas atas dan batas bawah dari spesifikasi akurasi PQA. Seluruh koreksi dan ketidakpastian, termasuk koreksi terbesar yang terdapat pada titik ukur 240 V, 5 A, dan sudut fase 60° sebesar 5%, serta ketidakpastian terbesar yang terdapat pada titik ukur 120 V, 5 A, dan sudut fase 60° dan -60° sebesar 1,92%, berada di dalam rentang spesifikasi akurasi PQA. Oleh karena itu, sistem kalibrasi dan metode analisis yang telah dilakukan pada penelitian ini dapat digunakan untuk menguji unjuk kerja dari PQA.

KESIMPULAN

Penelitian ini telah berhasil melakukan kalibrasi *power quality analyzer* (PQA) untuk besaran daya AC dengan menggunakan standar *multiproduct calibrator* (MPC) Fluke 5520A dan perangkat bantu *current coil 50-turn* Fluke 5500A. Dari hasil penelitian didapatkan koreksi pengukuran terbesar adalah 5% dan nilai ketidakpastian pengukuran terbesar adalah 1,92% dengan tingkat kepercayaan 95% serta faktor cakupan $k = 2$. Terdapat dua sumber ketidakpastian yang berperan se-

bagai penyumbang ketidakpastian terbesar dalam metode kalibrasi ini, yaitu resolusi pembacaan data pada PQA dan ketidakpastian sertifikat MPC untuk parameter arus. Verifikasi dilakukan dengan menggunakan spesifikasi akurasi dari PQA dan didapatkan nilai koreksi dan ketidakpastian pengukuran untuk semua titik ukur yang berada di dalam rentang batas atas dan batas bawah dari spesifikasi PQA. Oleh karena itu, dapat dikatakan bahwa sistem kalibrasi dan analisis yang dilakukan dapat digunakan untuk menguji unjuk kerja dari PQA.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Pusat Penelitian Metrologi LIPI yang telah memfasilitasi penelitian ini. Selain itu, penulis juga berterima kasih kepada Dr. Ika Kartika dari Pusat Penelitian Material dan Metalurgi LIPI atas bimbingan, kritik, dan masukan yang membangun selama penulisan ini.

DAFTAR ACUAN

- Bucci, Giovanni, Carmine Landi, and Caludion De Capua. 1999. "Power Measurement." *Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering* 33 (9): 964–74.
- Carranza, R, S Campos, A Castruita, T Nelson, A Ribeiro, E So, L Di Lillo, et al. n.d. "Final Report Key Comparison of 50/60 Hz Power - SIM.EM-K5." Mexico.
- Cepisca, C., G. Seritan, S. Grigorescu, and F. Argatu. 2013. "Aspects of Metrological Calibration of Power Quality Analyzers." *Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE), 2013 8th International Symposium on IEEE*, 1–4. doi:10.1109/ATEE.2013.6563507.

- Faisal, Agah. 2015. "Penetapan Sistem Acuan Daya AC Untuk Laboratorium Standar Nasional Berdasarkan Standar Watt Coverter." *Jurnal Standardisasi* 17 (1): 11–20.
- Faisal, Agah, Windi Kurnia Perangin-angin, and M. Syahadi. 2012. "Kalibrasi Standard Daya Listrik Dengan Metode Pengukuran Langsung Menggunakan Standard Watt Converter." *Pertemuan Dan Presentasi Ilmiah Kalibrasi, Instrumentasi, Dan Metrologi (PPI-KIM) Ke-38*, 512–22.
- Fluke Corporation. 2002. "Instruction Sheet, Model 5500A / COIL, 50-Turn Current Coil." PN 600616. Rev. 6, 12/02. United State of America.
- . 2003. *Operators Manual 5520A Multi-Product Calibrator*. Rev. 6, 1/03. United State of America.
- . 2006. *Getting Started, Fluke 434 / 435 Three Phase Power Quality Analyzer*. Netherlands.
- Jaiswal, Shiv Kumar, V N Ojha, and Ajeet Singh. 2005. "Estimation of Uncertainty in Measurement in Precision Calibration of DC High Current Source up to 100 A." *Journal of Scientific and Industrial Research* 64 (9): 666–73.
- JCGM. 2008. *JCGM 100 : 2008, Evaluation of Measurement Data: Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*. 1st ed. JCGM. doi:10.1373/clinchem.2003.030528.
- KESDM. 2007. *Peraturan Menteri Energi Dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia Tentang Aturan Jaringan Sistem Tenaga Listrik Jawa-Madura-Bali*.
- Munir, Miftahul, and Agah Faisal. 2014. "Penerapan Metode Komparasi Pada Kalibrasi Standar-Antara Untuk Besaran Daya AC." *Pertemuan Dan Presentasi Ilmiah Kalibrasi, Instrumentasi, Dan Metrologi (PPI-KIM) Ke-40*, 319–30.
- National Measurement Institute of Australia. 2012. "Measurement Report on Energi Meter ZERA Model RMM 3001." Australia.
- P2M-LIPI. 2012. "Work Instruction of Calibration Method of Single Phase AC Power Meter." 1st Edition. Tangerang Selatan.
- . 2015. "Sertifikat Kalibrasi Multifunction Calibrator Fluke 5520A." Tangerang Selatan.
- Syahadi, Mohamad, R. Hadi Sardjono, and Lukluk Khairiyati. 2012. "Verifikasi Sistem Pengukuran Tegangan AC Berbasis METCAL 7.20 Berketelitian Mencapai 2 Ppm." *Jurnal Standardisasi* 14 (1): 22–33. doi:10.1017/CBO9781107415324.004.

